

## Slide Titre

- Bonjour à toutes et à tous ; je suis Juste Rimbault, doctorant à Géographie-cités et au LVMT.
- Je remercie le jury pour l'honneur qu'il me fait d'évaluer ce travail de thèse, et le public pour sa présence.
- Je remercie les rapporteurs pour le travail fourni. J'ai pris bonne note des corrections suggérées.
- La version courante en inclut une grande partie, et l'ensemble sera pris en compte dans la version finale.
- Je vais présenter mon travail de thèse, qui a porté sur la caractérisation et la modélisation de la co-évolution des réseaux de transport et des territoires.

## Parcours

- Pour commencer, il est important d'expliciter mon parcours personnel.
- Cela permettra de mieux appréhender certains positionnements et choix qui seront développés par la suite.
- Partant d'une formation d'ingénieur généraliste, mon intérêt pour l'urbain m'a poussé vers la découverte du monde de l'architecture et de l'urbanisme, puis vers une formation à l'Ecole des Ponts et Chaussées.
- J'ai suivi en parallèle la formation interdisciplinaire du Master Systèmes Complexes, dont le choix m'a été suggéré par la rencontre déterminante de Paul Bourguin et Kashayar Pakdaman, que je remercie aujourd'hui.
- Finalement, la logique de mon parcours m'a conduit à une orientation progressive vers les sciences humaines et sociales.
- Le choix de la géographie a justement permis d'articuler ces deux aspects théorique et thématique dont j'ai rapidement positionné l'intégration comme une composante cruciale de mon identité scientifique.
- Les illustrations à droite montrent cette évolution progressive dans les modèles développés à différentes périodes :
  - le jeu de la vie implémenté pour un projet d'informatique ;
  - un modèle de morphogenèse hybride développé pendant le master 2 avec Arnaud Banos et René Doursat ;
  - un réseau biologique auto-organisé développé avec Arnaud Banos et Jorge Gonzalez pendant le master 1;
  - et enfin une analyse des dynamiques territoriales en Ile-de-France que j'ai menée pendant ma thèse.

## Exemple introductif

- Je propose pour introduire le sujet de présenter un exemple concret issu d'observations de terrain.
- Le développement récent du réseau à grande vitesse Chinois permet d'observer des interactions effectives entre réseaux et territoires, ici dans le cas particulier des réseaux de transport et du développement urbain.
- Je relate ici le cas du Delta de la Rivière des Perles, et plus particulièrement le quartier de Tangjia sur la commune de Zhuhai.
- Ces photos donnent un témoignage personnel. Par exemple à gauche, la photo de la devanture de la gare de Tangjia montre une publicité pour la promotion de l'utilisation du train et de la proximité à la gare, ce qui témoignent d'une volonté d'adaptation des pratiques de mobilité quotidienne ou résidentielle.
- Sur la photo de droite on observe des quartiers entièrement nouveaux en construction autour des gares. Ces deux phénomènes d'évolution urbaine semblent induits par l'arrivée du nouveau réseau de transport.
- Ce cas particulier n'illustre que le haut de l'iceberg de dynamiques complexes d'interactions, puisque l'existence de relations réciproques, à différentes échelles d'espace et de temps et affectant différentes dimensions des objets concernés, semble être la règle.
- Je prends dans ma thèse le parti d'étudier cette complexité selon le point de vue particulier de la co-evolution que je vais expliciter par la suite.

## Problématique

- Je peux à présent préciser la problématique générale de la thèse et la stratégie que j'ai adoptée pour y répondre.
- Un certain nombre d'approches, comme celle de la théorie évolutive des villes élaborée par Denise Pumain, et en particulier les travaux d'Anne Bretagnolle dans le cas des réseaux de transport et des villes, postulent des dynamiques fortement couplées entre ces deux objets. Celles-ci sont comprises comme co-évolutives, au sens d'interdépendances réciproques fortes entre les différentes composantes du système.
- Mon premier axe de recherche est ainsi de tester la pertinence de ce positionnement, en cherchant à construire une définition précise ainsi qu'une méthode de caractérisation empirique de ces dynamiques co-évolutives.
- Pour de nombreuses raisons que je ne peux détailler intégralement ici, mais qui incluent par exemple les spécificités de chaque cas d'étude considéré, des dynamiques qui s'opèrent sur le temps long, des couplages fort entre composantes rendant leur compréhension plus difficile, la connaissance est rapidement limitée.
- Je considère alors la modélisation comme un instrument de connaissance à part entière, permettant de tirer des conclusions indirectes sur les processus, de considérer des systèmes génériques, de tester des hypothèses dans des laboratoires virtuels, à différentes échelles et selon différents aspects.
- Le deuxième axe de recherche s'articule ainsi autour de la construction de modèles de co-évolution, incluant la détermination d'échelles et ontologies pertinentes pour cette modélisation.
- La modélisation est bien un sujet d'étude à part entière, confirmant la dualité de notre travail affirmée précédemment.
- Nous nous inscrivons ainsi dans une lignée scientifique conséquente de modélisation en géographie quantitative particulièrement développée ici à Géographie-cités et à l'institut des systèmes complexes, notamment récemment dans le cadre du projet ERC Geodiversity.

## Cartographie des disciplines

- Afin de comprendre le positionnement et l'enjeu posé par notre problématique, je propose d'abord une synthèse de l'état de l'art des approches pouvant être reliées à la modélisation des interactions entre réseaux et territoires.
- J'ai donc mené un travail d'épistémologie quantitative, dont l'un des aspects est une cartographie des connaissances.
- Ayant élaboré une méthode qui se base sur un couplage d'analyse de réseaux de citations et de réseaux sémantiques, j'en présente ici une sortie qui est une carte issue de la spatialisation d'un réseau de citations.
- On peut observer le positionnement relatif des disciplines, de la géographie politique ainsi que la géographie quantitative et les études des effets structurants à gauche.
- La physique est à l'opposée à droite, le pont étant fait par des travaux en économie urbaine, des études d'accessibilité et en transports.
- Mon positionnement est donc nécessairement à cheval sur l'ensemble de ces disciplines : mes modèles de systèmes de villes empruntent à la géographie, ceux de morphogenèse à la physique et à l'économie, tandis que les études d'accessibilité jouent un rôle crucial dans les études empiriques que je mène.
- De plus, cette étude me permet de confirmer qu'un très faible nombre d'approches se positionne explicitement comme modélisant une co-évolution, et que celles-ci sont dispersées dans différents domaines.

## Lecture par les domaines de connaissance

*slide a*

- Je propose à présent de détailler une grille de lecture originale des résultats qui seront présentés par la suite.
- L'articulation selon différentes dimensions de la connaissance peut en fait se généraliser, et on peut formuler une lecture de la thèse au prisme des *Domaines de connaissance*.
- Celui-ci a été initialement introduit par Livet, Sanders et Muller pour la construction de modèles de simulation en sciences sociales, et permet de prendre du recul sur l'organisation des connaissances produites.
- On peut voir ici les trois domaines initiaux, théorique (constructions conceptuelles, ici une partie du cadre ontologique utilisé), empirique (connaissances concrètes, ici une étude d'accessibilité pour le delta de la rivières de perles) et de la modélisation (ici l'un des modèles pour les systèmes de villes appliqué à la France).

*slide b*

- Un approfondissement de la lecture par domaines m'a conduit rapidement à intégrer trois domaines supplémentaires, ceux des méthodes, outils et données. J'ai également été amené à contribuer dans ceux-ci.
- L'ensemble de ces domaines sont tous en interaction forte dans mon travail. L'objectif de modèles opérationnels justifie certains compromis théoriques par exemple pour la définition des objets.
- Ces compromis s'illustrent aussi pour l'empirique avec des restrictions dues aux données disponibles.
- Ainsi, l'objectif de modélisation est atteint par divers compromis et interactions entre les différents domaines.
- La suite de la présentation suivra ce prisme de lecture et déclinera mon travail selon ces différents axes.

## Positionnement théorique

*slide a*

- Je peux commencer ainsi par détailler les fondations théoriques.
- Elles permettent de préciser la définition de la co-évolution des réseaux et des territoires, et d'y suggérer des entrées thématiques pertinentes.
- Concernant la construction des objets géographiques étudiés, mon entrée sur les villes et les territoires suit celle de la Théorie évolutive, considérant les villes comme systèmes dans des systèmes de villes, et les territoires comme les étendues spatiales associées.
- Au sein des territoires émergent des réseaux par l'intermédiaire de la réalisation de projets transactionnels au sens de la théorie territoriale des réseaux de Gabriel Dupuy.
- Reformulé sous cet angle, l'existence et la nature des processus de co-evolution entre réseaux de transport et territoires revient à comprendre les processus précis par lesquels cette matérialisation peut s'opérer, et réciproquement dans quelle mesure celle-ci peut influencer les dynamiques territoriales.

*slide b*

- Je construis alors une définition de la co-évolution, basée sur une perspective multi-disciplinaire.
- Je propose 3 niveaux possibles auxquels de processus de co-évolution peuvent opérer :
  - celui des agents, individuels ou collectifs, lorsque les caractéristiques d'un petit nombre d'agents s'influencent réciproquement ;
  - celui des populations d'agents - qui correspondra au sens originellement introduit par la biologie, supposant l'existence de niches au sein desquelles les caractéristiques de deux populations d'individus sont mutuellement et circulairement liées;
  - le dernier niveau systémique correspondant à des interdépendances généralisées entre agents.



*slide c*

- Trois entrées que j'ai prises correspondent à ces niveaux et donnent des pistes pour répondre à la problématique :
  - des études empiriques ont permis d'appréhender certains aspects du niveau microscopique;
  - une entrée par la morphogenèse, que l'on peut comprendre comme l'émergence de la forme et de la fonction d'un système, est suggérée par le concept de niche
  - une entrée par la théorie évolutive permettant d'appréhender les systèmes au niveau macroscopique.
- Cette présentation s'intéressera particulièrement aux deux dernières entrées.

## Méthode de caractérisation

- Elaborant sur ces bases théoriques, celles-ci appellent une vérification empirique, qui implique alors un travail méthodologique de construction d'une méthode de caractérisation.
- En effet, la littérature n'en propose pas dans le cas des systèmes territoriaux qui correspondrait à notre définition prise.
- Je me positionne à l'intermédiaire entre des méthodes en géographie qui se basent sur des corrélations simples ou des cartographies, et des méthodes en économie utilisant par exemple des variables instrumentales, dont l'application est conditionnée entre autres à une grande disponibilité de données. J'adapte pour cela des méthodes existantes en analyse de séries temporelles.
- Le schéma ici décrit le principe de l'application d'une méthode de corrélations spatio-temporelles retardées à des variables caractéristiques des éléments étudiés.
- Plus précisément, supposons la donnée de variables de mesure pour les dynamiques des territoires et pour celles des réseaux, qui seront par exemple la croissance de la population et celle de l'accessibilité.
- La corrélation entre les séries temporelles correspondantes peut être estimée avec un retard entre les deux séries temporelles. Celle-ci permet de caractériser une relation d'influence dirigée entre les deux variables, qui je le précise est bien une corrélation et non une causalité. On parlera pour simplifier de causalité faible.
- Par exemple, la première ligne montre une corrélation toujours nulle en fonction du retard  $\tau$  en abscisse, et donc pas de relation entre les variables. La deuxième et la troisième ligne un maximum pour un retard positif ou négatif, et donc un sens de causalité faible entre les variables. La dernière nous intéresse particulièrement, puisque une causalité réciproque s'observe, ce qui correspondra à une co-évolution au sens statistique de la population que nous avons défini.
- La dernière colonne donne l'interprétation de ces relations sous forme d'un graphe entre variables.

## Observations empiriques

- L'application de cette méthode à différents cas d'étude, à différentes échelles temporelles et spatiales, donne des résultats contrastés.
- Je présente ici une étude réalisée en collaboration avec Solène Baffi, pour le cas de l'Afrique du Sud au 20ème siècle.
- Nous considérons les croissances de l'accessibilité ferroviaire, au sens d'une population accessible à une portée spatiale donnée, et de la population des villes, sur le temps long entre 1930 et 2000.
- On peut voir ici les graphes de corrélations retardées en fonction du retard, sur différentes fenêtres temporelles successives, la couleur déclinant différentes portées spatiales. Les barres d'erreur permettent la prise en compte de la significativité statistique.
- Le cas de l'Afrique du Sud est particulier, puisque la mise en place des politiques de ségrégation de l'apartheid en 1950 ont conduit à des fortes restructurations du systèmes urbain et de transport.
- On peut observer ici un effet statistiquement significatif d'inversion du sens de la causalité faible au cours du temps : le maximum de corrélation pour les longues portées, à un retards négatif avant 1950 passe à un retard positif après 1950, passant d'une dynamique où l'accessibilité induit la population à l'inverse.
- Cet effet est en coherence avec les logiques documentées dans la littérature de relocalisations forcées et de réseau ferroviaire établi pour maintenir cette ségrégation.
- Meme si elle reste partielle, cette etude suggère donc un impact des politiques de ségrégations non seulement sur les dynamiques territoriales, ce qui était déjà connu, mais aussi sur leur relations avec celles des réseaux, en quelque sorte un effet au second ordre.

## Aperçu des contributions en modélisation

*slide a*

- Je peux à présent m'attaquer à mes contributions sur le plan de la modélisation, dont voici un aperçu global.
- Ma première ligne de contributions se situe sur le plan des modèles macroscopiques, dans la lignée des modèles Simpop développés dans le cadre de la théorie évolutive des villes.
- J'ai introduit une famille de modèles inédite prenant en compte explicitement les processus de co-évolution entre croissance des villes et croissance des réseaux de transport.
- Son application à réseau statique permet déjà de révéler des effets de réseau par une amélioration de l'ajustement sur le système de villes français.
- J'ai par ailleurs montré, par l'application de la méthode de caractérisation empirique, que ces modèles étaient capables de produire une très grande variété de régimes d'interaction, incluant des régimes co-évolutifs.

*slide b*

- Sur le plan mésoscopique, un premier modèle de morphogenèse permet le couplage fort entre évolution de la forme urbaine et croissance du réseau.
- Celui-ci se place dans une perspective de multi-modélisation.
- Les différents processus inclus se montrent complémentaires pour couvrir l'ensemble de l'espace morphologique généré, ainsi que pour sa calibration sur données réelles.
- Une deuxième modèle, le modèle Lutecia, initialement introduit par Florent Le Nechet dans sa thèse en 2010, a été étendu et exploré, afin de comprendre le rôle des processus de gouvernance pour la croissance du réseau de transport.

*slide c*

- Je vais à présent détailler plus particulièrement les idées sous-jacentes aux modèles macroscopiques d'interaction.

## Modélisation macro

*slide a (splitted)*

- Je rappelle que les modèles macroscopiques que j'ai introduit se basent sur les paradigmes de modèles d'interaction au sein des systèmes de villes, dans la lignée des modèles Favaro-Pumain ainsi que Marius développé par Clémentine Cottineau. A l'intermédiaire entre un modèle agent et un modèle discret de système dynamique, ils permettent de capturer la complexité via la non-linéarité, en moyennant les effets stochastiques.
- On peut considérer les villes et leur populations, localisées dans l'espace.
- On considère également le réseau de transport entre celles-ci. Dans cette spécification du modèle, il n'est pas permis d'évolution topologique mais une évolution des vitesses des liens.
- On a pour l'évolution des populations un terme de croissance endogène correspondant au modèle de Gibrat. Ce modèle stipule que les taux de croissance des villes ont une distribution aléatoire indépendante de la taille des villes.
- On peut ensuite ajouter un terme de croissance due aux interactions directes, qui correspond à un modèle gravitaire. Il s'agit d'une traduction abstraite de flux migratoires entre villes par exemple.
- Enfin, un terme de rétroactions des flux permet d'inclure un effet du réseau sur la croissance des villes.
- Le réseau enfin peut quant à lui croître en fonction des flux, selon différentes spécifications, comme par exemple une fonction de renforcement : plus le flux dans le lien a été important, plus l'évolution de la vitesse sera grande. Ce renforcement peut être conditionné à un seuil.

*slide b*

- L'application d'une version co-evolutive du modèle à des systèmes de villes synthétiques révèle de nombreuses configurations en termes d'interactions entre variables de territoires et variables de réseau, au sens de la caractérisation empirique par corrélations retardées.
- On obtient notamment un nombre important de régimes aux causalités circulaires correspondant à une co-evolution.
- Ces graphes montrent les corrélations retardées en fonction du retard, pour chaque couple de variable en couleur parmi accessibilité, population et centralité de proximité.
- Chaque graphe présente un régime particulier, codé en cartouche par la structure du graphe relationnel entre les variables.
- Considérons par exemple le second.
- Les forts effets d'autocorrelation induisent une corrélation à l'origine non nulle, et la relation entre variable se lit par rapport à celle-ci.
- Pour la centralité et l'accessibilité, on a uniquement une corrélation plus forte pour  $\tau > 0$ , et donc la première cause la deuxième.
- Pour la population et l'accessibilité, l'accessibilité cause la population.
- Enfin, le dernier couple montre une relation circulaire (double flèche) avec l'existence de deux maxima, et témoigne d'une co-evolution.
- Les autres régimes ici peuvent être interprétés de la même façon, et j'insiste sur le fait que leur diversité est un résultat important produit par le modèle.
- Ainsi, cet exemple a illustré une façon de modéliser la co-evolution entre réseaux de transport et territoires, et quel type de résultats on peut espérer en tirer.

## Mise en perspective

- Avant de conclure sur les perspectives ouvertes, je souhaiterais remettre en contexte le coeur de la thèse au regard de son cadre plus global, contenu notamment dans les annexes, qui permettent une articulation plus générale.
- Le travail de définition de la co-évolution, qui a requis la mise en place d'un certain niveau de réflexivité, d'approches interdisciplinaires, et de méthodes et d'outils d'analyse d'épistémologie quantitative, s'inscrit au sein de deux axes de travail en épistémologie et épistémologie quantitative.
- La caractérisation peut être associée à des travaux thématiques plus larges, qui permettent d'appréhender indirectement d'autres aspects des relations entre territoires et réseaux.
- Enfin, la modélisation s'inscrit au sein de l'élaboration de cadres systémiques, à différents niveaux d'abstraction, incluant le cadre de connaissance qui a guidé notre lecture ici.

## Ouvertures

*slide a*

- Les perspectives de recherche ouvertes par ce travail sont diverses, à la fois en ce qui concerne les modèles introduits en eux-même et la modélisation de la co-évolution, mais aussi des perspectives plus larges.
- Je rappellerai tout d'abord quelles sont mes contributions principales.
- La définition que j'ai proposé de la co-évolution dans le cadre des systèmes territoriaux devrait permettre une relecture de la théorie évolutive, en particulier au prisme de la co-évolution des réseaux de transport et des territoires. Elle ouvre aussi des potentialités de ponts avec l'économie géographique, puisque celle-ci a été mobilisée pour sa construction.
- La méthode de caractérisation, malgré ses limites, est bien opérationnelle et parcimonieuse en termes de données requises, et également très générique. Elle devrait pouvoir être appliquée dans divers cas en géographie et sciences territoriales.
- Enfin, les modèles introduits pourront être réutilisés par diverses disciplines, puisque ceux-ci ont été voulu interdisciplinaires, et sont pensés pour être couples et réutilisés.



*slide b*

- Je me permets enfin de mentionner des développements déjà en cours ou des perspectives plus lointaines.
- Dans le cadre de développement de méthodes génériques d'exploration de modèles spatiaux, ici à l'ISC avec l'équipe d'OpenMole que je remercie d'ailleurs de m'avoir accueilli, une partie du modèle lutecia est utilisée comme modèle jouet de test.
- Ceci nécessite un redeveloppement du modèle dans un autre langage, rappelant les problématiques de passage à l'échelle pour l'utilisation de calcul intensif : en effet, malgré les environ 200 ans de calcul utilisés pour la thèse, les explorations sont restées modestes et simples concernant les méthodes appliquées.
- Maintenant du côté du développement des méthodes, ce modèle est une excellente opportunité, autant un moyen qu'une fin pour poursuivre la recherche dans ce domaine.
- Je propose finalement de formuler un projet à long terme qui s'oriente vers la construction de théories intégratives pour les systèmes territoriaux.
- Integrative au sens de la feuille de route des systèmes complexes c'est-à-dire à la fois horizontalement (répondant à des questions transversales) et verticalement (c'est-à-dire multi-échelles).
- Une piste pour la construction de telles théories serait le couplage de la théorie évolutive à celle du scaling, par l'intermédiaire du couplage des modèles développés ici, par exemple le couplage du modèle d'interaction au sein des systèmes de villes avec le modèle de morphogenèse.
- Je conclurai simplement et modestement, et de la même manière que le mémoire.
- Cela permettra de rappeler et d'appuyer l'importance de la science ouverte que j'ai pratiquée et défendue tout au long de mon travail.
- Je suivrai ainsi l'adage de framesoft selon lequel *la route est longue mais la voie est libre*.

**Je remercie le jury de m'avoir écouté et lui soumetts ainsi ce travail en candidature au diplôme de docteur en géographie de l'université Paris Diderot.**